



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# TERÄKSEN JATKUVAVALUN HALLINTA

Valtteri Haavisto

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

syyskuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Teräksen jatkuvavalun hallinta

Anssi Valtteri Haavisto

Oulun yliopisto, Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023

Työn ohjaajat yliopistolla: Jari Ruuska, Aki Sorsa

Tämän kandidaatintyön aiheena on teräksenvalmistuksessa käytettävä jatkuvavaluprosessi ja sen hallinta. Työn tavoitteena on esitellä jatkuvavaluprosessi osana nykyaikaista teräksenvalmistusta, sekä tuoda esille jatkuvavalukoneen ohjauksessa käytettyjä automaatoratkaisuja. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena tarkastellen aiheesta aiemmin tehtyjä julkaisuja ja valukoneen säätöratkaisuja tarjoavien yritysten internetsivuja.

Jatkuvavalun hallinta perustuu nykypäivänä jo suurelta osin matemaattisten mallien käyttöön. Monimutkainen teräksen jähmettymisprosessi on haastava mallinnettava, mutta se parantaa olennaisesti prosessin toimintaa. Tässä työssä pohditaan nykypäivän jatkuvavalun haasteita ja esitellään tulevaisuuden näkymiä ja ratkaisuja valukoneiden automaation ja hallinnan osalta.

# ABSTRACT

Control of continuous casting in steelmaking

Valtteri Haavisto

University of Oulu, Process Engineering

Bachelor's thesis 2023

Supervisors at the university: Jari Ruuska, Aki Sorsa

This bachelor's thesis presents the continuous casting process and automation solutions related to its control. The thesis is implemented as a literature review by examining previous studies on the subject and the websites of companies offering casting machine control solutions.

Mathematical models play a major role in controlling today's continuous casting process. The complex solidification process of steel poses challenges to the modelling, but it also substantially improves its operation. In this work, these challenges have been considered, as well as the future of casting machines and their automation.

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	5
2 Teräksen valmistus.....	6
2.1 Teräskonvertteri .....	7
2.2 Sulan teräksen jatkokäsittelyt.....	7
2.3 Jatkuvavalu.....	8
2.4 Aihoiden käsittely .....	9
2.5 Valukoneet .....	9
3 Automaatio.....	11
3.1 Mittaukset.....	11
3.2 Säättöpiirit ja tavoitteet .....	13
3.3 Mallien käyttö .....	14
4 Pohdinta .....	17
4.1 Haasteet .....	17
4.2 Tulevaisuus .....	18
5 Yhteenveto .....	19
LÄHDELUETTELO.....	20

## 1 Johdanto

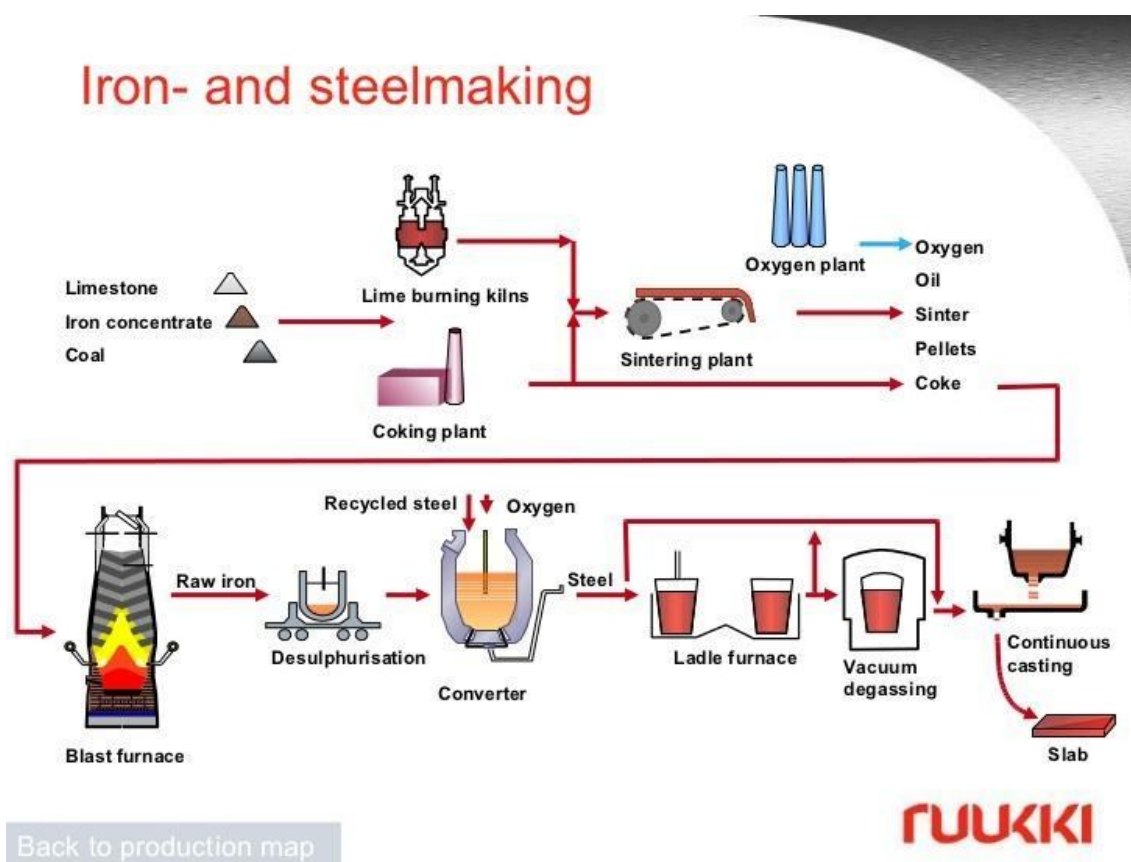
Tämä kandidaatintutkielma käsittelee teräksen valmistusprosessia ja erityisesti jatkuvavalukoneen ohjausta. Ajatus tähän työhön syntyi kesätöistäni SSAB:n Raahen tehtaalla työskennellessäni siellä jatkuvavalukoneilla 4 ja 5. Valukoneen toiminta ja automaatiikka verrattain haastavissa olosuhteissa oli mielenkiintoista seurattavaa, jonka vuoksi se aiheeksi valikoitukin. Tässä työssä käytetyt tiedot ovat peräisin aiemmin tehdyistä opinnäytetöistä, kirjallisuudesta, ja verkkojulkaisuista.

Työn tavoitteena on esitellä jatkuvavalukoneiden toimintaa ja automaatiota, sekä tarkastella uusia ja kehitteillä olevia mahdollisuuksia valukoneen toimintaan ja ohjaukseen. Työ on rajattu nykyaikaisiin kaareviin jatkuvavalukoneisiin ja niiden hallintaan.

Valukoneiden automaatio on nykyään jo korkealla tasolla, mutta alati tiukentuvien tuote-, energia-, turvallisuus-, sekä päästövaatimusten täyttämiseksi on sitä syytä kehittää pidemmälle. Automatisoidut prosessit parantavat kaikkien edellä mainittujen vaatimusten täyttöä, kun muun muassa inhimillisten virheiden osuus pienenee.

## 2 Teräksen valmistus

Jotta voidaan perehtyä jatkuvavalukoneen ohjaukseen ja hallintaan, prosessin pääasiallinen toiminta ja käyttötarkoitus on oltava tiedossa. Tässä kappaleessa esitellään teräksenvalmistuksen prosessivaiheita, joissa sulasta raakaraudasta syntyy valmiita teräsaihoita.



*Kuva 1. Raahen terästehtaan prosessikaavio*

## 2.1 Teräskonvertteri

Teräksen valmistus alkaa raakaraudan melloituksella, eli hapen puhaltamisella sulaan raakarautaan. Masuunissa valmistettu raakarauta sisältää 4–5 % hiiltä. Teräksissä pitoisuus on tavallisimmin alle 1 % ja yleisissä rakenneteräksissä, jotka muodostavat suurimman teräslajiryhmän, alle 0,2 %. Raudan hiili palaa reaktiossa muodostaen CO-kaasua ja lopputuotteeseen ei-toivotut epäpuhtaudet siirtyvät pääosin kuonaan. Puhallus suoritetaan sisältä lämpövuoratuilla konverttereilla, joihin happi tuodaan yleensä niiden yläosasta noin kaksinkertaisella äänennopeudella. Konvertterin pohjasta puhalletaan inerttiä kaasua, kuten typpeä tai argonia. Konvertteriin annostellaan puhalluksen yhteydessä lisäaineita riippuen teräksen halutuista ominaisuuksista. Myös kierrätysterästä voidaan lisätä konvertteriin jäähdyttämään hapettumisen vaikutuksesta lämpiävää raakarautaa. (Härkönen 2014, s. 35–36)

## 2.2 Sulan teräksen jatkokäsittelyt

Hiilenpoiston jälkeen sula, 1600–1700 °C teräs kaadetaan konvertterista senkkoihin. Senkat kuljetetaan nosturilla tai vaunuilla seostuspaikoille, joissa teräkseen halutut lisäaineet täsmätään oikeisiin pitoisuuksiin, sekä lämpötila hienosäädetään optimaaliseksi valua varten. Mahdollisia jatkokäsittelyjä ovat CAS-OB (Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling – Oxygen Blowing), tyhjiökäsittely ja senkkauuni. CAS-OB-osaprosessissa senkan pohjasta tulevan argonpuhalluksen avulla saadaan sula teräs esiin kuonan alta. Tämän muodostuneen aukon kautta sulaan voidaan lisätä seosaineita erityisellä lanssilla. Sulan lämpötilaa voidaan nostaa vielä tämän osaprosessin aikana lisäämällä alumiinia sulaan, koska syntyvä alumiinioksidi tuottaa huomattavasti lämpöenergiaa. Tyhjiökäsittely-, eli vakuumiuunissa tai tyhjiökammiossa suoritettava teräksen alipaineistus poistaa siihen liuenneita kaasuja, lähinnä vetyä ja happea. Hapen mukana sulasta poistuu myös hiiltä hiilimonoksidin muodossa. Tällä menetelmällä erittäin vähän, jopa alle 0,002 % hiiltä sisältävien terästen valmistus on mahdollista. Tyhjiökäsittelyn etuina ovat myös runsashiilisten raaka-aineiden käytön mahdollisuus ja teräksen muokkausominaisuuksien parantaminen. Senkkauunikäsittelyssä terästä voidaan lämmittää ja siihen voidaan lisätä seosaineita vielä ennen valua. Seosaineet ja

lämpötila saadaan tasattua sekoittamalla sulaa esimerkiksi magneettikelan tai kaasupuhalluksen avulla. Senkkauunin lämmitys toimii valokaariperiaatteella. Senkkauunissa teräksestä saadaan poistettua sulkeumia, kun ne nousevat pintakuonaan sekoituksen myötä. (Härkönen 2014, s. 48–49) Kaikki edellä mainitut käsittelyt tähtäävät hieman eri menetelmin parempaan teräksen laatuun joko poistamalla tai lisäämällä aineita ja tasaamalla lämpötilaa.

### 2.3 Jatkuvavalu

Kun sulaan teräkseen on seostettu halutut seosaineet ja sen lämpötila on kyseiselle laadulle sopiva valamisen onnistumiseksi, prosessissa on vuorossa teräksen valaminen aihioiksi. Nykyaikainen valaminen tapahtuu pääasiassa jatkuvavalukoneilla, mutta myös muita valumenetelmiä on käytössä ja kehitetään. Koko maailman terästuotannosta jatkuvavalun osuus on 95 % (Louhenkilpi 2014). Jatkuvavalu saa nimensä prosessin jatkuvuudesta, sillä sitä ei tarvitse keskeyttää jokaisen terässenkan välillä. Yleensä valusarjan aikana valetaan 4–10 senkallista, mutta myös pidemmät sarjat ovat mahdollisia (Härkönen 2014, s. 50).

Valun aikana sulan teräksen välivarastona on välisenkka, joka on tyypillisesti suorakaiteen muotoinen, lämmönkestävällä massalla vuorattu teräsastia. Välisenkassa käytetään välisenkkapeitostetta ehkäisemään sulan teräksen reoksidaatiota, pienentämään lämpöhäviöitä ja sitomaan teräksessä esiintyviä sulkeumia. Terässenkasta välisenkkaan laskettu sula teräs johdetaan edelleen keraamista jatketiiltä pitkin kokilliin. Kokillissa alkaa valunauhan muodostuminen, kun sula teräs jähmettyy pikkuhiljaa ulkoa sisälle päin jäähditysvesien vaikutuksesta. Valukoneen rullat vetävät valunauhaa samalla kun uutta terästä lasketaan kokilliin, joten sulan teräksen pinta kokillissa pysyy koko ajan samalla korkeudella. Sulan pinnalle syötetään jatkuvasti kullekin teräslaadulle sopivaa valupulveria, jolla on samat pääasialliset tehtävät kuin väliallaspeitosteella, mutta lisäksi se ehkäisee valunauhan kiinnitarttumista voitelemalla kokillia. (Heikkinen 2019, s. 21)

Kaarevan valukoneen tapauksessa rullasto lähtee kaartumaan pystysuorasta vaakaan, jolloin myös valmis aihio päättyy vaakasuoraan, eikä sitä tarvitse erikseen kaataa. On



myös olemassa muunlaisia valukoneita, joita käsitellään tarkemmin luvussa 2.2. Valukoneen rullista koostuvat sektiot tukevat ja ohjaavat sisältä vielä sulan teräsnauhan kulkua ja ehkäisevät sen pullistumista ferrostaattisen paineen vaikutuksesta. Jotkin rullista ovat moottoroitu hydrauliiikkamoottorein, jotta ne vetävät valunauhaa eteenpäin. Niin sanottu toisiovesi, eli suoraan valunauhan pintaan suihkutettava vesi-ilmasuihku jäähdyttää nauhaa edelleen sen kulkiessa sektioiden lävitse.

## **2.4 Aihoiden käsittely**

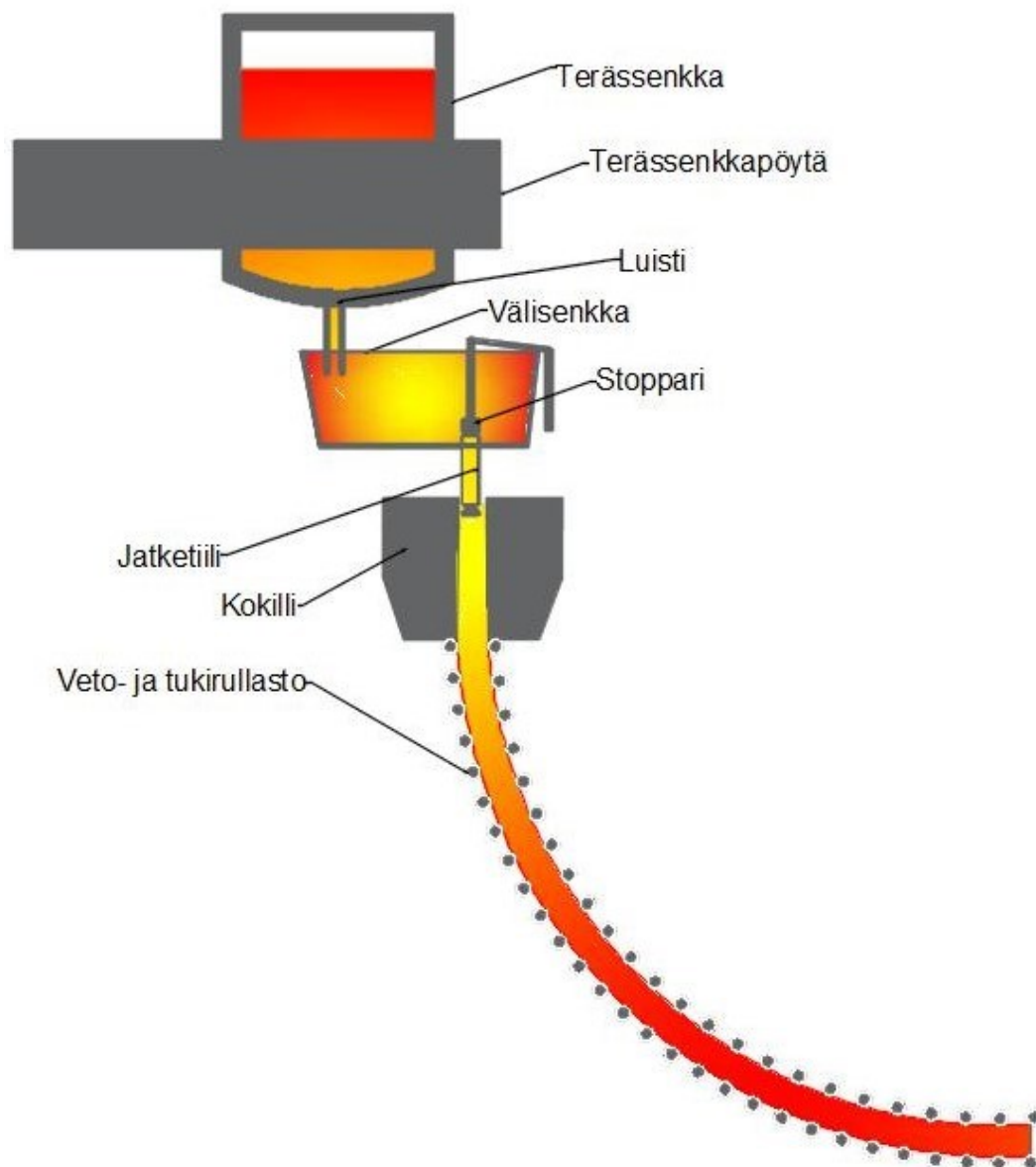
Valukoneen jälkeen jähmettynyt valunauha tulee rullarataa pitkin leikkauspaikalle. Valunauha leikataan halutun mittaisiksi aihioiksi joko kaasupolttimella tai mekaanisella leikkurilla. Aihiot ovat poikkileikkaukseltaan suorakaiteen, neliön tai ympyrän muotoisia, joiden paksuus vaihtelee 100 ja 300 millimetrin väliltä, leveyden ollessa yleensä 900–3000 mm. Leikkauksen jälkeen aihiot merkataan ja kuljetetaan vaunuilla tai nostureilla välivarastoon.

## **2.5 Valukoneet**

Jatkuvavalukonetyyppejä on useita erilaisia. Nykyaikainen valukone on tyypiltään kaareva, useimmiten kaarevalla kokillilla. Toinen kaarevan valukoneen tyyppi on suorakokillinen kone (Kuva 2), jonka haittoja verrattuna kaarevakokilliseen koneeseen on suurempien jännitysten ja venymien syntyminen, koska aihio joudutaan sekä taivuttamaan että suoristamaan, kun kaarevakokillisen koneen tapauksessa vain suoristus on tarpeen. (Louhenkilpi 1992, s. 22–23)

Lisäksi on olemassa niin kutsuttuja pystykoneita, eli valukoneita, jotka eivät kokillin jälkeen kaarru vaakasuoraan vaan valettu valunauha leikataan aihioiksi pystyasennossa ja kaadetaan leikaamisen jälkeen. Toisaalta myös pystyvalukone voi olla taivuttavaa mallia, jolloin se eroaa kaarevasta suorakokillisesta koneesta taivutuspaikan perusteella.

Valukoneet voidaan jaotella erilaisiin tyyppeihin myös aihion poikkileikkauksen perusteella. Kolme yleisintä poikkileikkauksiltaan erilaisia aihioita tuottavia koneita ovat billet-, bloom- ja slabvalukone. Slabvalukone, josta Suomessa käytetään nimitystä levyaihiovalukone, on laite, jonka aihion kapeampi sivu on yli 100mm ja kapean ja leveän sivun suhde yli 1/1.3. Bloomvalukoneen aihio on kooltaan suurempi kuin 150 mm ja sivujen suhde alle 1/1.3. Billet- eli teelmävalukoneen aihiot ovat poikkileikkaukseltaan neliön muotoisia ja niiden sivut ovat yleensä alle 150 mm. (Louhenkilpi 1992, s. 24-25)



Kuva 2. Havainnekuva kaarevasta valukoneesta (Mukaiillen Furtmueller & del Re 2008).

### 3 Automaatio

Nykyaikainen teräksenvalmistus edellyttää automaatiota alati kasvavien tuote-, energia-, turvallisuus-, sekä päästövaatimusten täyttämiseksi. Tietokonein ohjatut ja säädetyt prosessit ovat tarkempia, jolloin näiden vaatimusten täyttäminen on helpompaa vähemmällä työvoimalla. Automaatioasteen kasvaessa tuottavuus ja tuotteen laatu paranee. Automaatio ei välttämättä rajoitu pelkästään tuotteen valmistusprosessiin, vaan se voi hoitaa myös prosessilaitteiden kunnonvalvontaa ja tuotteen laadun tarkkailemista. Myös raaka-aineiden hankinta ja tuotteen toimitusketjut voivat olla automatisoituja. Tässä työssä keskitytään kuitenkin erityisesti jatkuvavalukoneen automaatioon.

Valukoneen automaatio sisältää perusautomaation ja niin kutsutun optimoivan tason. Perusautomaatio on toteutettu yleensä takaisinkytketyillä säätöpiireillä ja logiikoilla. Optimoitava taso sisältää matemaattisia malleja, joiden avulla pyritään ennustamaan, optimoimaan tai ohjaamaan prosessin osia.

#### 3.1 Mittaukset

Valukoneessa on suuri määrä erilaisia antureita, jotka mittaavat prosessin ohjauksen kannalta tärkeitä suureita (Saarelainen 1999, s. 4). Mittausten tuloksia käytetään ohjaukseen sekä hälytyksiin, tai ne varastoidaan myöhempää käyttöä, esimerkiksi tilastointia tai laadunvalvontaa varten (Härkönen 2014, s. 97–98).

Jatkuvavaluprosessin yksi tärkeimmistä mittauksista on sulasta teräksestä kuparikokilliin siirtyvän lämmön mittaus kokilliin sijoitettujen termoelementtien avulla. Tämän lämmönmittausdatan avulla voidaan havaita aihion kuoren kiinnittartumat ja repeämät kokillissa. (Laine 1999, s. 2) Mittaus on tärkeä, koska kuoren kiinnittarttuminen voi johtaa ahiokuoren puhkeamiseen. Puhkeamatilanteessa sula teräs pääsee karkaamaan kuoren sisältä, mikäli valunopeutta ei hidasteta ja puhkeamakohta kerkeää ulos kokillista. Valukoneen puhkeama aiheuttaa aina suuria tuotannollisia menetyksiä, kun koko

alkupään teräksenvalmistus pysähtyy odottamaan koneen vahinkojen korjausta. Termoelementit on sijoitettu kokilliin tyypillisesti kahteen riviin jokaiselle kokillin neljälle sivulle. Kahden päällekkäisen termoelementin muodostaman parin lämmönmittausdatan kuvaajat leikkaavat repeämätilanteessa toisensa, kun sula teräs nostaa ensin ylemmän, ja sitten alemman mittauspisteen lämpötiloja hetkellisesti. (Päätalo 1999, s. 2–4)

ABB AB on kehittänyt uudenlaisen lämmönmittausmenetelmän, jossa kokilliin sijoitetut 4000 mittauspistettä on toteutettu valokuitua käyttäen. Tämän kerrotaan olevan yli 20 kertaa parempi resoluutioltaan verrattuna perinteiseen kokillin lämmönmittaukseen. (ABB 2019)

Toinen jatkuvavalukoneen tärkeä mittaus on sulan teräksen pinnanmittaus kokillissa. Kokillin pinnanmittaus voidaan toteuttaa monin eri tavoin, mutta kaikki mittaustavat omaavat omat ongelmansa. Radioaktiivinen mittaus on säteilyturvallisuuden kannalta ongelmallinen, kun taas pyörrevirtamittaus on hyvä mutta kallis vaihtoehto. Termoelementit soveltuvat huonosti pinnanmittaukseen. (Saarelainen 1999, s. 5)

Valunopeuden mittaus on luonnollisesti olennainen osa jatkuvavalun onnistumista. Valunopeuden säätö on tärkeä, sillä monet muut jatkuvavalun säädöt riippuvat siitä. Esimerkiksi kokilliin oskillointi, vetorullien nopeus, sekundaarijähdytyksen parametrit ja aihion kaasuleikkaimen nopeus riippuvat kaikki valunopeudesta. Valunopeus mitataan veto- tai tukirullien pyörimisnopeudesta.

Kitkanmittausta kokillista on pyritty käyttämään kokillin toimivuuden mittaukseen. Kitkanmittaukset on tavallisimmin toteutettu oskillointivoimaa mittaavilla venymäliuskoilla tai erilaisilla kiihtyvyyssantureilla. (Louhenkilpi 1992, s. 54–55).

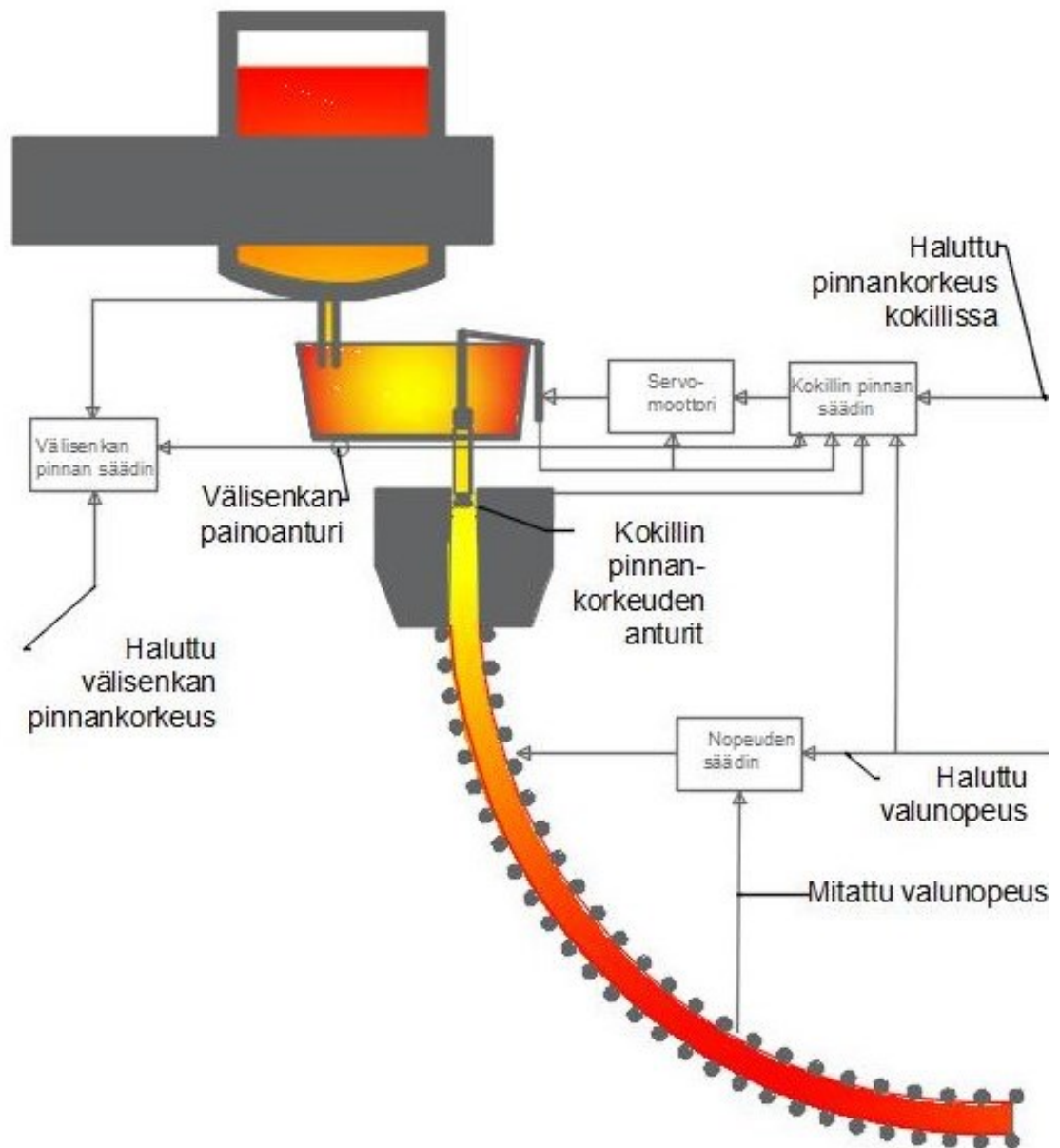
Välisenkan pinnanmittaus on useimmiten toteutettu välisenkan painoa mittaavilla antureilla, josta teräksen määrä välisenkassa lasketaan. Valmiin aihion lämmönmittaus sekundäärijähdytysalueella optisilla pyrometreillä on epäluotettavaa, koska aihiota jäähdyttävä vesi-ilmasuihku luo alueelle mittauksen kannalta hyvin haastavat olosuhteet. (Petrus ym. 2010)

### 3.2 Säättöpiirit ja tavoitteet

Valun kannalta erityisen merkittävä säättöpiiri on terässulan pinnanmittauksen mittaustuloksia käyttävä säättöpiiri (kuva 3), jota käytetään teräksen virtauksen säätelyyn välialtaasta kokilliin, jotta kokillin pinnankorkeus pysyisi vakiona. Ko. säättöpiirin tulee olla täysin automatisoitu sen vaativuuden vuoksi, varsinkin suurilla valunopeuksilla kokillin pinnankorkeuden toleranssien ollessa muutamia millimetrejä. Sulan teräksen pinnankorkeutta kokillissa voi säätää valunopeutta muuttamalla, mutta tämä aiheuttaa paljon rasituksia mekaniikalle, joten kokillin pinnankorkeuden säätelyyn käytetään lähinnä edellä mainittua säättöpiiriä. Kokillin pinnankorkeuden säättöpiirissä on useita tulosignaaleja, kuten valunopeus, itse pinnankorkeus, stopparin asento ja välisenkassa olevan teräksen määrä (Furtmueller & del Re 2008, s.701). Säättöpiirin toimilaitteena on teräksen virtausta välisenkkaan kontrolloivan stopparin hydrauliiikka. Pinnankorkeuden säättöpiiri toimii yleensä valvontaohjauksena (supervised control) alemman tason säättöpiireille, kuten kokillin ja sekundäärijäähdytyksen vesimäärille.

Myös sekundäärijäähdytys on yksi hyvin tärkeä säättöpiiri jatkuvavalun onnistumisen ja teräsaihion laadun kannalta, etenkin valunopeutta ja kokillin kokoa muutettaessa. Sekundäärijäähdytyksen säättöpiiri toimii valvovana säätönä jäähdytyksen vesimäärille (Craig ym. 2001). Sekundäärijäähdytyksen säädettävänä parametrina on jäähdytysvesien ja ilman virtausmäärät yleensä kullekin yksittäiselle vyöhykkeelle erikseen. Jäähdytyksen ja sen säädön tavoitteena on pitää aihion pinnan lämpötila optimaalisena sen halkeilun välttämiseksi ja tasaisen lämmönsiirron aikaansaamiseksi kokillin ja sekundäärijäähdytyksen välillä. (Graig ym. 2001; Petrus ym. 2010).

Muita valukoneen kokillin säättöpiirejä ovat sen oskillointi ja kokillin jäähdytysvesimäärät. Oskilloinnin taajuus on yleensä kytketty suoraan valunopeuteen. Valunopeuden säättöpiiri on yksinkertainen takaisinkytketty säättöpiiri, jossa valunopeutta muuttavana toimilaitteena on moottoroidut vetorullat kokillin jälkeen.



Kuva 3. Valukoneen tärkeimmät säätöpiirit (Mukaiillen Furtmueller & del Re 2008).

### 3.3 Mallien käyttö

Jos vertaillaan valukoneen säätöpiirejä keskenään, kokillin pinnansäätö on luonteeltaan kriittisempi ja monimutkaisempi muihin valukoneen perussäätöpiireihin verrattuna.

Paremmen säädön aikaansaamiseksi sitä on pyritty mallintamaan. Mallit pyrkivät kuvaamaan teräksen pinnankorkeutta kokillissa ottamalla huomioon erilaisia siihen vaikuttavia häiriöitä, kuten esimerkiksi jatketiilen tukkeutumista ja avautumista ja teräksen aaltoilua kokillissa. Yksi tällainen on Leen ym. (2004) erityisesti ohutaihiovalukoneelle (thin slab caster) kehittämä malli. Ohutaihiovalun suuremmat valunopeudet vaativat pinnansäädöltä nopeampaa reagointia hitaammille valunopeuksille suunniteltuihin perinteisiin säätöalgoritmeihin verrattuna. Leen ym. malli hyödyntää sumeaa logiikkaa yhdessä massavirtaa kompensoivan termin, verrannollisuustermin ja erosuureen kanssa.

Myös sekundäärijäähdytyksen optimointiin on kehitetty malleja. Petruksen ym. (2010) kehittämä reaaliaikaiseen malliin perustuva sekundäärijäähdytyksen ohjaus pyrkii pitämään aihion pinnan lämpötilan optimaalisena teräksen jähmettyessä sen saapuessa sekundaarijäähdytysalueelle. Kyseinen malliin perustuva säätö sisältää asetusarvon generoinnin, joka parantaa säädön toimintaa edelleen. Itse säädin koostuu kyseisessä mallissa kunkin jäähdytysvyöhykkeen omista PI-säätimistä. Lämpötilan mittaus on toteutettu hybridianturilla, joka yhdistää kokillin jäähdytysvesistä mitatun lämmönsiirron ja malliin perustuvan lämpötilaennustuksen sekundäärijäähdytysalueella. Malli estimoii reaaliajassa koko valunauhan lämpötilaa jakaen sen useisiin horisontaalisiin siivuihin ottaen huomioon kaiken saatavan tiedon valuolosuhteista, kuten kokillin lämmönvaihtelut, valunopeuden, teräksen lämpötilan, aihion leveyden ja jäähdytysvihkujen virtausmäärät. Mallin mukaan laskettua aihion lämpötilaa verrataan sen halutun lämpötilaprofiilin asetusarvoon, jonka mukaan jäähdytysvesien määrää automatiikka muuttaa. Ohjelma muodostaa myös aihion sulakartion visuaalisen kuvan operaattorin nähtäväksi.

Mauderin ym. (2012) malli jatkuvavalun optimaaliseen ohjaukseen käyttää sumeaa logiikkaa. Ongelman yksinkertaistamiseksi kyseisen mallin säätöparametreiksi on valittu ainoastaan valunopeus ja sekundäärijäähdytyksen veden ja ilman virtausmäärät. Tämän mallin algoritmi simuloi lämpötilajakaumaa satunnaisesti valittujen muuttujien arvojen pohjalta, ja lähtee parantamaan tuloksia kohti ennalta määritettyjä optimaalisia asetusarvoja päättämällä miten kutakin jäähdytysvyöhykettä ja valunopeutta säädetään.

Kyseinen oikeaan valukoneen geometriaan 3D-mallinnettu malli on validoitu pyrometriemittauksilla.

Samankaltainen kaupallinen mallinnusohjelmisto on Siemensin VAI:n DynaPhase, joka laskee teräksen termodynaamisia ominaisuuksia perustuen teräksestä otettuihin analyyseihin. DynaPhasea voidaan käyttää yhdessä sekundäärijähdytyksen mallin, Dynacs 3D:n kanssa, joka käyttää DynaPhasen dataa optimaalisen jäähdytyksen ylläpitämiseen. Kahdesta moduulista koostuva Dynacs 3D laskee ensin kolmiulotteisen lämpötilajakauman, jota toinen malli käyttää luodakseen parhaat mahdolliset asetusarvot sekundäärijähdytyksen vesimäärille, ilmanpaineille ja suuttimien asennoille optimaalisen valunauhan jäähtymisen saavuttamiseksi. DynaPhasen etuja ovat sen laskemat likvidus- ja soliduslämpötilat, sekä niiden pohjalta tuotetut lämpötilasta riippuvat tiheydet jähmettyvän valunauhan sisällä. (Hahn & Schaden 2014)



## 4 Pohdinta

Vaikka jatkuvavaluprosessia on tutkittu paljon ja erilaisia automatiikkaa ohjaavia malleja on olemassa, valuprosessi on edelleen paljon riippuvainen ihmisestä ja hänen toimistaan. Yksi syy tälle on valukoneiden pitkä käyttöikä, jolloin uusia automaatio- ja säätöratkaisuja on turha lähteä liittämään ennestään jo hyvin toimivaan koneeseen. Lisäksi erilaisia valutapahtuman ongelmia sinänsä hyvin ennustavia malleja on hankala käyttää esimerkiksi säätöön, koska ongelmia välttäviä säätöjä ei välttämättä ole olemassa tai vielä löydetty.

### 4.1 Haasteet

Jatkuvavaluprosessin haasteina ovat sulan teräksen aiheuttamat ankarat olosuhteet valukoneen ympäristössä. Mittauksia on hankala toteuttaa kuumuudesta, kosteudesta, pölystä ja värinästä johtuen, jolloin tärkeää tietoa prosessin tapahtumista on mahdotonta saada. Myös erilaiset teräslaadut aiheuttavat omat ongelmansa valussa. Esimerkiksi teräksen hiilipitoisuuden ollessa lähellä 0,1 %, on sen herkkyys pintavioille suuri ja hiilipitoisuuden ollessa 0,18 %, on halkeilun mahdollisuus suurimmillaan. Taipumus segregatioon ja muihin aihion sisäisiin vikoihin kasvaa, kun teräksen hiilipitoisuus ylittää 0,51 %. (Louhenkilpi, 2014)

Valukoneen fyysisesti haastavat olosuhteet eivät ole ainoa jatkuvavalun hallintaa vaikeuttava syy. Monet keskenään vuorovaikutuksessa olevat ilmiöt sulan teräksen virratessa ja jähmettyessä vaikeuttavat prosessin ennustettavuutta ja mallinnusta. Tällaisia ilmiöitä ovat muun muassa lämmönsiirto, jähmettyminen turbulenttiset virtaukset, tukkeutuminen, sähkömagneettiset vaikutukset, jännitykset, halkeamat ja segregatio. Näiden ilmiöiden yhdistäminen monifysikaaliseksi malleiksi on edelleen haastavaa. (Thomas 2018)

## 4.2 Tulevaisuus

Tulevaisuuden kehityskohteet jatkuvavaluprosessissa ja sen hallinnassa liittyvät ensisijaisesti prosessissa tapahtuviin ilmiöihin. Ilmiöiden paremman tuntemuksen avulla voidaan tuottaa toimivampia malleja, joiden pohjalta itse prosessia ohjataan. Näitä jatkuvavalun kehitettäviä osa-alueita ovat tukkeutumisen, sulkeumien syntyminen, segregaaation ja halkeamien ehkäisyyn liittyvät mallit ja käytännön ratkaisut. Näiden ongelmien ratkaiseminen edellyttää käytössä olevien tekniikoiden, kuten erilaisten kokeiden ja mallinnusten älykästä yhdistämistä (Thomas, 2018).

Teräksen laatua parantavista käytännön ratkaisuista sulan teräksen sähkömagneettinen virtauksen hallinta (Electromagnetic flow control, EMS, MEMS) on jo yleinen maailmalla. Tämä ABB:n kehittämä systeemi yhdistää sulan teräksen sekoituksen ja jarruttamisen kokillissa sähkömagneettisen kentän avulla. EMS tasoittaa teräksen lämpötilajakaumaa kokillissa ja vakauttaa teräksen käyttäytymistä nopeissa valuprosesseissa. (ABB, 2019) Toisaalta Louhenkilven (2014) mukaan sähkömagneettisella virtauksenhallinnalla on myös negatiivisia vaikutuksia, kuten erilaisten halkeamien ja segregatioiden lisääntyminen, sekä teräksen suurempi aaltoilu kokillissa, joten se onkin käytössä lähinnä billet- ja bloomvalukoneilla. Toinen teräksen laatua parantava, yhä enemmän käytössä oleva menetelmä on soft reduction, joka on käytössä muun muassa SSAB:n Raahen tehtaalla jatkuvavalukoneella 6. Soft reduction tekniikka perustuu aihion kuoren lievään yhteenpainamiseen teräksen ollessa vielä sulaa sen sisällä, jolloin teräksen segregatio ja huokoisuus aihion keskellä vähenee merkittävästi. Yhteenpainaminen toteutetaan säätelemällä vastakkaisten rullaparien väliä pienemmäksi. (Louhenkilpi, 2014)

Tulevaisuuden suuntia jatkuvavalukoneiden kehityksessä ovat Louhenkilven (2014) mukaan matalammat ja yksinkertaisemmat valukoneet, jotka ovat halpoja investointikustannuksiltaan, mutta ovat tuotannon ja ylläpidon suhteen joustavia.

## 5 Yhteenveto

Tämän työn aiheena oli jatkuvavaluprosessin esittely ja sen hallintaan perehtyminen automaation ja mallien käytön osalta. Valuprosessi sijoittuu teräksenvalmistuksen siihen kohtaan, jossa yleensä teräskonvertterissa tai valokaariuunissa valmistettu sula teräs saatetaan takaisin kiinteään olomuotoon. Jatkuvavalu on maailman eniten käytetyin teräksenvalmistusmenetelmä, sillä noin 95 % kaikesta maailman teräksestä valmistetaan jatkuvavaluprosessilla.

Jatkuvavalun hallinta on nykyään jo pitkälti automatisoitua, ja perustuu yhä enemmän matemaattisiin malleihin. Perusautomaatio on verrattain yksinkertaista ja toimii ihmistä tukien erilaisissa valuun liittyvissä tehtävissä. Optimoitavalla tasolla on kehityksen kohteita alkaen prosessin ilmiöiden paremmasta tuntemuksesta. Malleihin perustuvat laskelmat ovat ainoa tapa saada tarpeeksi tietoa valuprosessista, kun kaikkea tarvittavaa dataa prosessin optimointia varten ei voi mitata konkreettisesti.

Jatkuvavalun syrjäyttävää valumenetelmää ei ole näköpiirissä lähitulevaisuudessa, joten sen tutkiminen ja kehittäminen lisää on järkevää. Asiakkaiden kohoavat vaatimukset teräksen laadun ja puhtauden osalta ajavat kehittämään entistä parempia prosesseja ympäristönäkökulmaa unohtamatta. Automaatio on yksi ratkaisu prosessien energiatehokkuuden, tuottavuuden ja ekologisuuden parantamiseen tulevaisuudessa. Tutkimusta jatkuvavaluprosessista tarvitaan niin kenttäolosuhteissa kuin laboratorio- ja simulaatiotasolla. Ilmiöiden parempi ymmärrys ja mallinnus on avainasemassa jatkuvavalukoneen automaatiota kehitettäessä.

## LÄHDELUETTELO

Craig I.K., Camisani-Calzolari F.R., Pistorius P.C., 2001. A contemplative stance on the automation of continuous casting in steel processing. *Control Engineering Practice*, Volume 9, Issue 9, Pages 1013-1020, ISSN 0967-0661, [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00089-2).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066101000892>) [viitattu 13.3.2023].

Furtmueller C., del Re L. 2008. Control issues in continuous casting of steel. Teoksessa: Pradeep M. (toim.) 17th IFAC World Congress. Soul: International Federation of Automatic Control, S. 700-705.

Hahn, S., Schaden, T., 2014. Dynaphase: Online Calculation of Thermodynamic Properties during Continuous Casting. *Berg Huettenmaenn Monatsh* 159, 438–446. Saatavissa: <https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1007/s00501-014-0305-6> [viitattu 3.4.2023].

Heikkinen E.-P. 2019. Sulan teräksen valmistus, Jatkuvavalu [verkkodokumentti]. Oulu: Oulun Yliopisto. Saatavissa: <http://cc.oulu.fi/~kamahei/b/opinnot/L20-21-SulaFeValmistus.pdf> [viitattu 25.4.2022]. 37 s.

Hooli, P., Mörwald, K., Louhenkilpi, S., Härkki, K., Rytty, I., Sirviö, M., Wendt, J., Matkala, J., Peltonen, M., Saarelainen, E., Laine, J., Päätaalo, J., Karhu, P., Kivelä, E., Lindqvist, L., Tukiainen, M., Hätönen, T & Virtanen, P., 1999. *Valu ja jähmettyminen*. Oulu: Merityrsky Oy 250 s. ISBN 952-9618-39-5.

Härkönen S. (toim.), 2014. *Teräskirja*. 9. painos. [verkkodokumentti] Helsinki: Metallinjalostajat ry. Saatavissa: [https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja\\_flip/mobile/index.html#p=2](https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja_flip/mobile/index.html#p=2) [viitattu 14.4.2022]. 116 s.

Lee, D., Kueon, Y., Lee, S., 2004. High performance hybrid mold level controller for thin slab caster. *Control Engineering Practice*, Volume 12, Issue 3, Pages 275-281, ISSN 0967-0661. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(03\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(03)00081-9) [viitattu 23.4.2023].

Louhenkilpi, S., 2014. Chapter 1.8 - Continuous Casting of Steel. Teoksessa: Seetharaman, S. (toim.) *Treatise on Process Metallurgy*. Stockholm: Royal Institute of Technology, S. 373-434. ISBN 9780080969886 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00007-9>.

Louhenkilpi, S., 1992 *Metallurgin hyvä tietää: Jähmettyminen ja jatkuvavalu*. Oulu: Oulun yliopisto, 84 s. ISBN 951-42-3439-1.

Abb, 2019. Offerings, ABB in Metals, Digital, Continuous casting real-time optimization. [verkkodokumentti]. Zurich: ABB Asea Brown Boweri Ltd. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106930A8100&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> [viitattu 15.4.2023].

Petrus, B., Zheng, K., Zhou, X., Thomas, B.G., Bentsman J., 2010. Real-Time, Model-Based Spray-Cooling Control System for Steel Continuous Casting. *Metall Mater Trans B* 42, 87–103. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9452-7> [viitattu 11.3.2023].

Mauder, T., Sandera, C., Stetina, J., Masarik, M., 2012. A fuzzy logic approach for optimal control of continuous casting process. *METAL 2012 - Conference Proceedings*, 21st International Conference on Metallurgy and Materials.

Thomas, B.G., 2018. Review on Modeling and Simulation of Continuous Casting. *steel research int.*, Volume 89, Issue 1, 1700312. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/srin.201700312> [viitattu 15.4.2023].